

# 바이오가스 마이크로 터빈 발전용 전처리시스템 전산유동해석

허 광 범\* · 박 정 극\* · 임 상 규\* · 김 재 훈\*\*

## Computational Fluid Dynamics Analysis of the Pretreatment System for Livestock BIO-GAS MGT Power Generation

Kwang-beom Hur\*, Jung-keuk Park\*, Sang-gyu Rhim\*, Jae-hoon Kim\*\*

**Key Words** : Micro Gas Turbine(마이크로 가스터빈), Sulfur Removal Tower(탈황장치), Bio Gas(바이오가스)

### Abstract

KEPCO(Korea Electric Power Corporation) is performing the nation's first biogas-MGT project as an effort to encourage the utilization of wasted biogas which contains useful CH<sub>4</sub>. The goals of this project are to develop the Pretreatment system of Livestock bio-gas and set up the biogas-MGT co-generation system. The project will not only utilize flared biogas as precious energy but also improve the economics of the plant a lot. The pretreatment system mainly consists of sulfur removal tower, biogas compressor and many filtering systems. A computational fluid dynamics study in the bio gas sulfur removal tower and sulfur adsorption filter was carried out. Understanding of the flow in the sulfur removal tower and sulfur adsorption filter obtained by this study can be used to identify the problems in the sulfur removal tower and to improve the sulfur removal efficiency of the sulfur removal tower. Resistance material modeling is used to simulate the sulfur adsorption filter, and the resistance coefficient was adjusted to reflect the experimental pressure loss value. And the pressure loss change with the flowrate is predicted

### 1. 서론

본 논문에서는 축산 바이오가스 마이크로 가스터빈 발전시스템의 핵심 전처리 시스템의 설계 제작을 위하여 실험으로 파악하기 힘든 건식탈황탑 내부 흡착제 주위의 유동현상을 전산유동해석 연구를 통하여 수행하였다. 전산유동해석에 의해서 건식탈황탑 내부 흡착제 주위의 유동벡터 및 압력분포와 같은 유동 현상을 파악함으로써, 탈황효율을 저하시키는 원인과 탈황효율을 향상시킬 수 있는 방안에 대한 개념을 구할 수 있고, 유량의 변화에 따른 탈황탑 내부 각 부분에서의 압력변화를 파악함으로써, 실험없이도 흡착제 및 탈황탑에 의한 압력손실을 예측하고자 한다.

### 2. 발전시스템 설계

#### 2.1 전처리 시스템 설계

Fig. 1은 바이오가스 전처리시스템 개략도에서는 공주시 축산폐기물 처리장에 설치된 바이오가스 전처리시스템 및 이를 통한 소형열병합발전시스템까지의 전체적인 공정을 나타낸다.

전처리 시스템은 19.5~40Nm<sup>3</sup>/hr의 가스 유량 범위내에서 마이

크로 가스터빈에 연료를 공급하게 되는데 가스 유량은 CH<sub>4</sub>의 함량과 밀접한 관계를 가지고 있다. 이론상 바이오가스는 CH<sub>4</sub>의 함량이 100%일 때 열량이 8,500Kcal이며, 마이크로 가스터빈의 연소에 필요한 열량은 106,000Kcal이므로 가스 내에 CH<sub>4</sub>의 함량이 63.95%일 때 전처리 시스템에서 필요한 유량은 19.5 Nm<sup>3</sup>/hr가 되며, CH<sub>4</sub>의 함량이 31.18%일 때 필요한 유량은 40Nm<sup>3</sup>/hr가 된다.

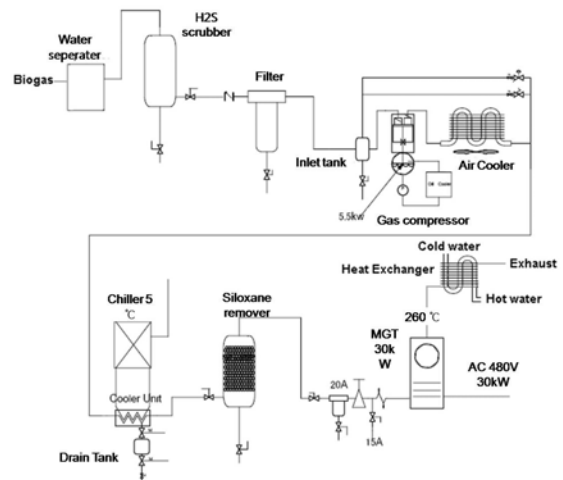


Fig. 1 Schematic diagram of biogas-MGT system

\* 한국전력공사 전력연구원, kbhur5798@hanmail.net

\*\* BK21 Mechatronics Group,  
충남대학교 기계설계공학과 교수,  
kimjhoon@cnu.ac.kr.

즉, 바이오 가스 내 CH<sub>4</sub>의 함량이 높으면 높을수록 마이크로 가스 터빈에서 필요로 하는 유량은 줄어들게 되는 것이다. CH<sub>4</sub>의 함량에 따른 유량 조절은 마이크로 가스 터빈의 연료 조정밸브에서 연소온도를 체크하여 마이크로 가스 터빈에서 요구하는 106,000Kcal에 맞춰 열량이 부족할 경우 조정밸브를 열어 유량을 크게 하고, 과다할 경우 조정밸브를 닫아 유량을 적게 함으로써 마이크로 가스 터빈의 운전조건을 맞추게 된다.[1,2]

## 2.2 마이크로 가스 터빈 기술 특성

Fig.2에 나타난 바와 같이 마이크로 터빈에 적용된 최신 기술은 크게 세가지로 나누어 볼 수 있다.[3,4]

- (1) 압축기와 터빈 사이에 로터의 자체 회전으로 공기막이 형성되는 공기베어링이 채용되어 기존의 오일 윤활 계통이 생략되기 때문에 설비가 간단해지고 주기적인 정비가 불필요하며 운전의 신뢰성도 높아진다.
- (2) 2~4극 영구자석발전기에서 발생하는 고주파의 교류전력을 정류기를 통해 직류로 변환하고 인버터를 통해 최종적으로 교류를 발생시키기 때문에 감속기가 불필요하여 설비가 간단해진다.

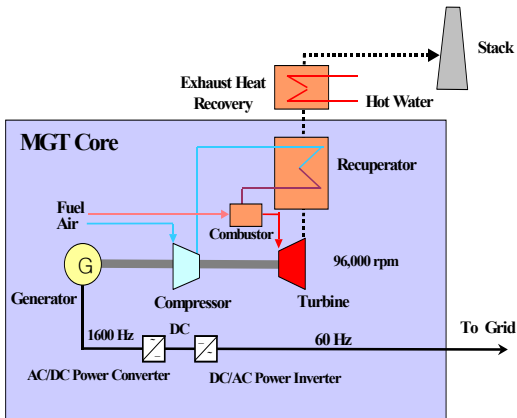


Fig. 2 Micro Gas Turbine Configuration (Capstone Corp. USA)[3,4]

- (3) 재생사이클을 채택하여 기존 가스 터빈의 열효율 15%(저위발 열량 기준)를 증가시켜 약 30%에 육박하는 고효율 가스 터빈 발전이 가능하다.

## 3. 탈황탑 유동해석

### 3.1 전산유동해석 영역 및 조건

전산유동해석의 대상이 되는 탈황장치의 개략도를 Fig. 4에 나타내었다. Fig. 3에서 (1)은 수분제거장치이며, (3)이 건식탈황탑 이고, (2)는 건식탈황탑 내부에 있는 흡착제를 나타내고 있다.

여기서 전산유동해석의 범위는 건식탈황탑 입구 배관에서부터 건식탈황탑을 포함하여, 건식탈황탑 출구 배관까지로 잡는다. 수분제거장치와 탈황탑을 연결하는 배관이 상대적으로 가늘고 길기 때문에 수분제거장치 내부에서의 유동상황은 연결배관을 흘러오는 동안에 배관유동으로 변하기 때문에 탈황탑 내부의 유동에 거의 영향을 미치지 않기 때문에, 탈황탑과 그 입출구 배관만 유동해석을 해도 탈황탑 내부 및 흡착제 주위의 유동해석에 충분하다고 판단된다.

탈황탑 실린더 원통 내경은 250mm 이고, 탈황흡착제는 높이 1800mm 로 두 플랜지 사이에 충전되어 있다. 탈황탑 실린더 원통 위와 아래의 돔형 마개는 각각 높이 200mm 이고, 중앙에 50mm 의 직선부를 가진 반경 100mm 인 사분원의 회전체와 아

래쪽에 100mm 의 원통직선부로 이루어져 있다. 탈황탑 입출구에 연결된 배관은 내경이 25mm 인 원형파이프이다.

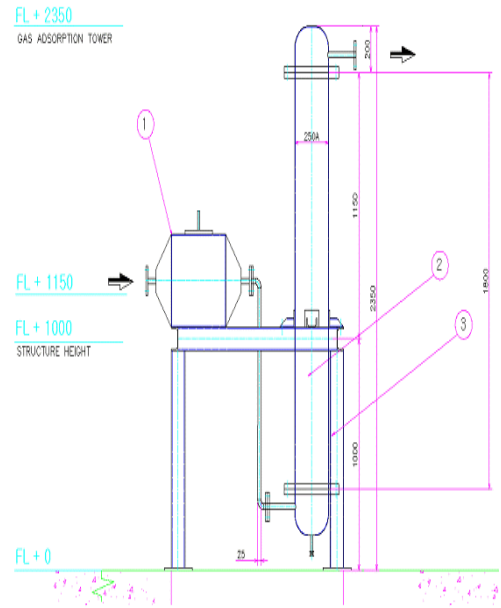


Fig. 3 Schematic of the sulfur removal equipment

이 건식탈황탑에 유입되는 바이오가스는 질량비로 메타 45%, 질소 54%, 이산화탄소 0.89%, 산소 0.11% 로 구성되고, 섭씨 20도로 탈황탑으로 유입된다.

전산유동해석을 하기 위해서는 유체의 밀도와 점도가 필요한데[6], 다양한 액체, 기체에 대한 물성을 가지고, 배관망 유동해석을 하는 Piping Systems Fluid Flow v.3.10.2 에서 바이오가스의 물성을 계산해 보면, 예서와 같이 밀도 1.17 kg/m<sup>3</sup>, 점도 0.015 cP(centiPoise) 로 계산된다.

건식 탈황탑 내부에 있는 탈황흡착제는 전산유동해석에서는 저항요소나 다공성 물질로 모델링 될수 있다.[7] 정확한 전산유동해석 결과를 얻기 위해서는 탈황흡착제의 재질 및 구조를 명확히 파악하고 이로부터 저항계수 값이나, 다공성물질의 permeability 나 open area ratio 값을 정확하게 입력하여야 한다. 그러나, 현실에서는 대체로 탈황흡착제의 재질 및 구조를 정확히 파악하기 힘들므로, 실험적 방법으로 이러한 값들을 추정할 수 있다.

바이오가스가 건식 탈황탑에 유입되는 양은 30 m<sup>3</sup>/h 이고, 건식탈황탑 입구 배관에서의 압력은 35kPaG 이다. 이러한 조건에서 실험을 하였을 때, 건식탈황탑의 흡착제 전후단 압력차는 4 mmAq 로 측정되었고, 이 값이 흡착제의 모델링에 사용된다. 참고로, 이때의 수분제거장치 및 탈황탑을 포함한 탈황장치의 전후단 압력차는 14mmAq 로 측정되었고, 이 값은 전체 전산유동해석의 신뢰성을 검토하는데, 활용될 수 있다.

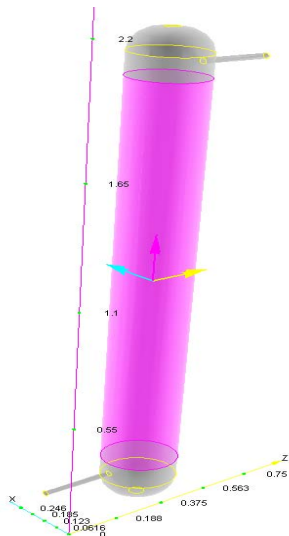
### 3.2 전산유동해석 방법

본 전산유동해석 연구에서는 CFdesign v.9 라는 상용 CFD (Computational Fluid Dynamics) 소프트웨어를 사용한다.[8]

전산유동해석을 위해서 3차원 캐드에서 형상을 스케치하여, 탈황탑 물체를 회전체로 만들고, 입출구 파이프를 탈황탑 몸체

까지 돌출시켜서 CFdesign에서 사용할 3차원 모델을 만들었다. 3차원 모델을 parasolid 로 변환하여 저장하여, CFdesign 으로 읽어들이는 형상을 Fig.4에 나타내었다.

입구경계조건으로 왼쪽의 입구파이프의 입구면에 유량 30 m<sup>3</sup>/h 및 압력 35 kPaG 를 적용하였으며, 출구 경계조건으로 오른쪽의 출구 파이프 출구면에 유량 30 m<sup>3</sup>/h 를 적용하였다. 나머지 부분은 자동으로 고체경계면으로 적용된다. 유체의 물성을 입력하기 위하여 입출구 파이프를 포함한 돔 형상의 부분에 앞에서 계산한 바이오 가스의 밀도 1.17 kg/m<sup>3</sup> 와 점도 0.015 cP(centiPoise)



**Fig. 4** Shape of the sulfur removal tower as the CFD analysis domain

= 0.00015 poise 를 적용하였다. Fig. 4에서 붉은 색으로 표시된 가운데 부분의 흡착제를 모델링 하기 위하여, 흡착제 부분을 resistance 로 지정하고, 2절에서 측정된 유량 30 m<sup>3</sup>/h 일때, 250mm 인 탈황흡착제 양단의 차압 4 mmAq 를 반영하여, 흡착제 내부의 평균 유속 0.17 m/s, 이때 손실계수  $\zeta = \frac{\Delta p}{1/2 \cdot \rho v^2} = 2316$  를 Flow-Through K 의 손실계수로 입력하였다. Normal Direction 1 과 Normal Direction 2 의 손실계수값으로는 이값의 100 배에 해당하는 231600 을 입력하였다.

유동해석은 비압축성, 난류유동으로 계산하였으며, 난류모델은 k-epsilon 모델을 사용하였다.

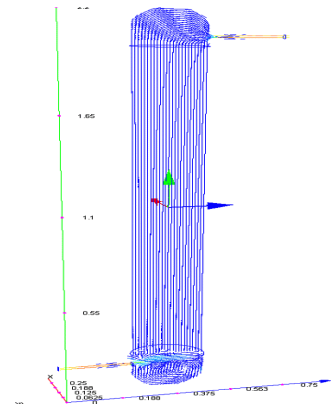
#### 4. 전산해석 결과

##### 4.1 유동해석 결과

해석결과의 타당성을 확인하기 위해서 개략적인 유속벡터를 Fig.5 - 7 에 나타내었다. Fig. 5에서는 탈황탑 전체의 유속벡터를 나타내었는데, 100배의 유속차를 가지는 벡터들을 한번에 그 방향을 표시하기 위하여 균일한 벡터 길이로 표현하였으며, Fig. 9는 하부돔의 유속벡터를, Fig. 7은 상부돔의 유속벡터를 확대하여 나타내었는데, Fig. 6과 7은 국소적으로 상하부 돔 내부의 유

동 방향과 그 크기를 검토하기 위하여, 유속에 비례하는 벡터길이를 표현하였다.

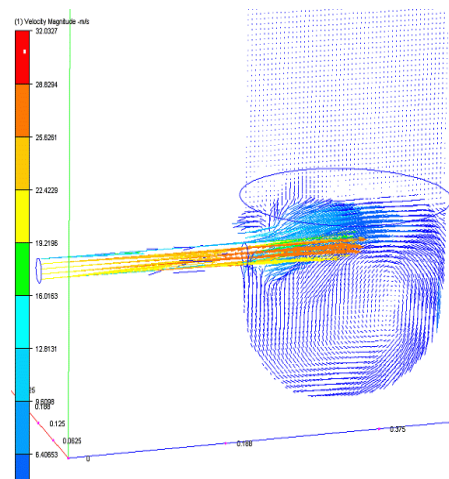
Fig. 5 입구부분 및 Fig. 6을 보면, 입구파이프에서 약 17m/s 로 강하게 유입되는 바이오가스는 제트형태로 분사되어 우측벽에 부딪치고, 위쪽은 흡착제에 의해서 제한되기 때문에, 하부 돔 내에서 시계방향으로 아래쪽을 돌면서 디퓨져 되어, 상부의 흡착제 내부로 들어가게 된다.



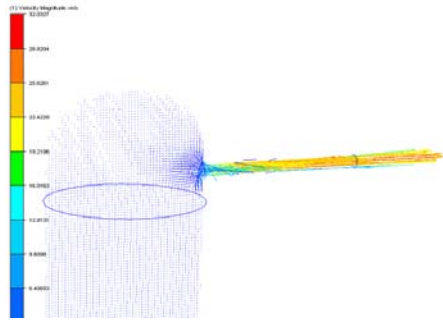
**Fig. 5** Overall flow pattern in the sulfur removal tower (vectors are show in uniform vector length)

Fig.5의 흡착제 몸통에서는 위쪽으로 약 0.17 m/s 의 유속으로 거의 균일하게 흐르며, 상부돔으로 균일한 유동이 나간다.

Fig.5의 상부돔 및 Fig.7을 보면, 상부돔에서 우측에 17m/s 로 빨려나가는 좁은 구멍이 있으므로, 균일하게 상부돔으로 유입된 유동은 상부돔을 타고 돌아서 우측의 출구 파이프로 유입되며 가속된다



**Fig. 6** The flow vector plot at the inlet pipe and lower dome-type space (vector length represents the flow velocity manitude)

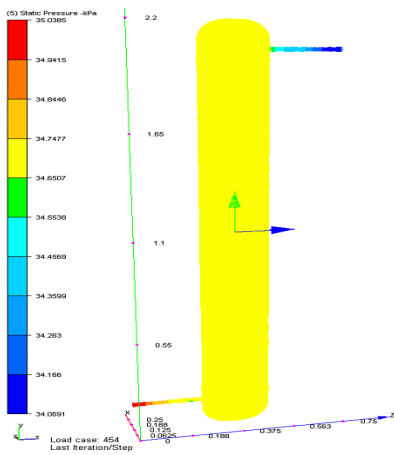


**Fig. 7** The flow vector plot at the upper dome-type space and outlet pipe(vector length represents the flow velocity manitude)

이상과 같은 전체적인 유동상황은 유체역학적으로 합리적인 경향을 나타내고, 해석이 정성적으로 합리적임을 확인할 수 있다.

#### 4.2 압력분포 해석

Fig. 8에는 건식 탈황탑 내부의 압력분포를 나타내었다. 계산결과와 압력등고선 값들을 보면, 입구 파이프에서는 대략 200 ~ 300 Pa 정도의 압력손실이 생기고, 출구 파이프에서는 500 Pa 정도의 압력손실이 생기는데, 입구파이프 중간부분에서 하부돔, 탈황흡착제, 상부돔을 거쳐 출구파이프 입구까지는 압력손실이 동일한 등고선으로 표시되어 90 Pa 정도로, 흡착제 전후단 압력손실이 4 mmAq 정도라는 실험값을 잘 모사하고 있고, 흡착제의 모델링의 적합성을 알 수 있다.

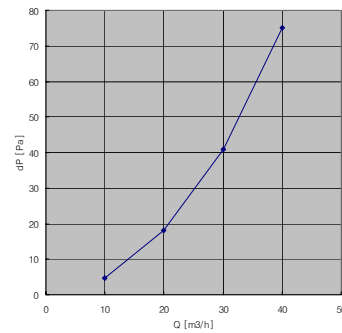


**Fig. 8** The pressure distribution inside the sulfur removal tower.

다만, 입구 파이프와 출구파이프에서의 압력손실값은 실험값 10mmAq 에 비해서 상당히 크게 예측되는데, 이러한 가는 파이프 부분에서의 정확한 압력손실 예측을 위해서는 많은 격자수와 파이프 벽쪽에서의 격자밀집이 필요하지만, 본 계산에서 이 파이프 부분은 탈황탑에 입구 및 출구 경계조건을 주는 부분으로 집중하였다.

유량에 따른 탈황흡착제의 압력손실의 변화를 보기 위하여, 유량을 10, 20, 30, 40  $m^3/h$  로 변화시키며 계산된 압력손실을 Fig. 12에 표시하였다. 전반적으로 압력손실은 유량의 제곱에

비례하는 형태를 보이고, 유량의 변화에 따른 탈황탑 내의 압력손실을 예측할 수 있다.



**Fig. 9** Pressure loss across the sulfur adsorption filter with flowrate.

#### 5. 결 론

바이오 가스 마이크로 가스터빈의 전처리시스템 설계를 위하여, 건식 탈황탑 내부 및 탈황흡착제 주위의 유동장을 CFdesign 이라는 FEM 기법을 사용하는 상용 전산유동해석 소프트웨어를 이용하여 해석하였다. 해석결과는 유체역학적으로 합리적인 현상을 나타내고 있고, 측정하여 제시한 유량-압력손실 관계를 잘 반영하고 있다.

전산유동해석 결과 입구파이프, 하부 돔, 탈황흡착제, 상부 돔, 출구 파이프에서의 유동장을 파악할 수 있었다. 또한, 유량에 따른 각 부위에서의 압력손실을 계산한 결과, 건식탈황탑의 압력손실에서 탈황흡착제가 차지하는 부분은 상대적으로 크지 않음을 알 수 있다. 이는 탈황효율을 중요시하는 탈황설비의 설계가 유체역학적으로 합리적임을 의미한다.

#### 참고문헌

- [1] Kashiwagi Takao, Hashimoto Naoto, Kanaya Toshinobu, 2001, "Micro Power Revolution", Vol. 2, pp. 107-115.
- [2] McCarty P.L., 1964, "Anaerobic Waste Treatment Fundamentals", Public Works, 95
- [3] Capstone Corporation, 2003, "MicroTurbine Model C60 System Manual", Vol. 3 pp. 57-98.
- [4] Kwang-beom Hur, Jae-hoon Kim, 2006, "Study on the Performance Characteristics of MGT Co-generation System", Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering Vol. 16 NO.9 pp. 964-970
- [5] Park. J.K., Rhim, S.K., and Hur, K.B., 2007, "THE BIOGAS-MGT DISTRIBUTED GENERATION SYSTEM DEVELOPMENT PROJECT IN THE CITY OF GONG-JU, KOREA", Report of KEPRI, pp. 128-168.
- [6] Frank M. White, 1994, *Fluid Mechanics*, 3rd Edition, pp.251-285.
- [7] L.J.Gibson and M.Ashby, 1997, "Cellular solids", Cambridge univ. press, pp.2-11
- [8] BRNI Inc, 2007, "Cfdesign v.9.0 user's guide", Chapter 14, pp.11-14.